

6 Wellen & Quanten

Inhalt

6.1 Einleitung	95
6.2 Was ist vorher zu tun?	96
6.3 Physikalischer Hintergrund & Messverfahren	96
6.3.1 Wozu Quanten?	96
6.3.2 Das Wasserstoffatom	97
6.3.3 Licht ist (auch) eine Welle	99
6.3.4 Beugung	99
6.3.5 Interferenz	100
6.3.6 Optische Spalte und Gitter	101
6.3.7 Die Grenzen der Auflösung	104
6.4 Experimentelle Aufgaben	105
6.4.1 Beugung am Einfachspalt	105
6.4.2 Beugung am Hindernis	106
6.4.3 Gitterspektrometer	106
6.4.4 CD oder DVD?	107
6.4.5 Auflösungsvermögen eines Objektivs	108
6.4.6 Die Balmer-Serie	109
6.5 Wie geht es weiter?	109
6.6 Hinweise zur Auswertung	109
6.6.1 Beugung am Einfachspalt & am Hindernis	109
6.6.2 Gitterspektrometer	110
6.6.3 CD oder DVD?	110
6.6.4 Auflösungsvermögen eines Objektivs	110
6.6.5 Die Balmer-Serie	110

6.1 Einleitung

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts erlebte die Physik gewissermaßen eine Klassik. In der Fachwelt breitete sich tatsächlich die Vorstellung aus, es gäbe nichts mehr zu erforschen, die Physik sei im Grunde »abgeschlossen«. Kurze Zeit später erwies sich das als krasse Fehleinschätzung – das 20. Jahrhundert begann mit einer Reihe von wichtigen Entdeckungen, die zur Entwicklung der beiden grundlegenden Säulen moderner Physik führten: der Quantentheorie durch Max Planck und andere, sowie der Relativitätstheorie durch Albert Einstein. Es blieb kein Stein auf dem anderen.

Diese Entwicklung machte viele Physikerinnen dieser Zeit skeptisch. Selbst die Wegbereiter der Quantentheorie hatten zeit ihres Lebens Schwierigkeiten, die Implikationen des von ihnen entwickelten Modells zu akzeptieren.¹ Die Kernaussagen dieser modernen Theorien stehen im Widerspruch zu unserer Intuition, welche sich schließlich nur an Dingen schulen konnte, die kleiner sind als ein Mond und größer als ein Molekül. Heute, gut 100 Jahre später, kann man allerdings festhalten: Die Vereinigung von Quantentheorie und Relativitätstheorie mag zwar noch ausstehen, aber für sich genommen – innerhalb ihres jeweiligen Geltungsbereiches² – sind beide Theorien tausendfach empirisch bestätigt. Daran gibt es von seriöser Seite³ keinen Zweifel mehr.

Dieser letzte Versuchstag soll einen Ausblick geben auf die Quantentheorie und ihre Anwendungen in der Biologie und Chemie.

6.2 Was ist vorher zu tun?

- Lesen Sie das **Skript** zu diesem Versuchstag, also die folgenden Seiten.
- Sorgen Sie dafür, dass Sie den **Theorieteil** verstanden haben! Falls Ihnen Grundlagen fehlen, ist es in Ihrer Verantwortung, diese aufzuarbeiten. Gute Lehrmaterialien zu diesen Themen findet man problemlos im Internet.
- Fertigen Sie **Messwerttabellen** an (im Team), achten Sie dabei auf das korrekte Format und lassen Sie ggf. Details (Einheiten) zunächst frei.
- Zu Ihrer Schonung gibt es am Ende des Semesters **weder Rechenaufgaben noch Kontrollfragen**. Das soll aber nicht heißen, dass Sie unvorbereitet zum Versuchstag erscheinen sollten.

6.3 Physikalischer Hintergrund & Messverfahren

6.3.1 Wozu Quanten?

Es gibt viele Phänomene, die nur im Rahmen der Quantentheorie erklärt werden können. Um die vorletzte Jahrhundertwende gab es drei ungelöste Rätsel, die die Entwicklung der Quantentheorie besonders vorangetrieben haben:

Warum sind Atome stabil? Die Streuversuche von Ernest Rutherford und seinen Mitarbeiterinnen ergaben, dass die gesamte positive Ladung und 99,9 % der Masse eines Atoms auf engstem Raum im Kern konzentriert sind. Die Elektronen, welche bekanntlich die negative Ladung tragen, halten sich in einem gewissen Abstand zum Kern auf. Aber wie soll das gehen? Wenn die Elektronen sich nicht bewegen, werden sie vom positiv geladenen Kern angezogen und stürzen in ihn hinein. Wenn sie aber den Kern umkreisen wie ein Planet seinen Stern, ist das Atom nach außen ein zeitlich veränderlicher Dipol. Das würde elektromagnetische Strahlung produzieren, die Energie aus dem System abführen würde – das Elektron würde langsamer werden und schließlich ebenfalls in den Kern stürzen. Soweit die Analyse im Rahmen der klassischen Physik, aber Atome sind

¹ Berühmt geworden ist der trotzigste Ausspruch von Einstein: »Gott würfelt nicht«, mit dem er seine Abneigung gegenüber der sog. *Kopenhagener Interpretation* der Quantentheorie zum Ausdruck brachte.

² Es wäre z.B. denkbar, dass die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) sich als Spezialfall einer allgemeineren Theorie für nicht zu große Energien entpuppt, so wie die Newtonsche Gravitationstheorie der Grenzfall für niedrige Energien der ART ist. Dadurch würde sie aber nicht »falsch« – es wäre dann nur klar, wo ihr Geltungsbereich endet.

³ Wer seine Email-Adresse im Kontext von Physik veröffentlicht – das betrifft Professorinnen, aber auch Fachschaftsverteiler –, muss sich leider regelmäßig mit den Ergüssen von Spinnern auseinandersetzen, die Widersprüche in der ART oder der Quantentheorie gefunden haben wollen. Die Motivation für diesen amateurhaften Revisionismus besteht oft in (strukturellem) Antisemitismus und blickt damit auf eine lange Tradition zurück. Solches Geschwurbel firmiert dann unter dem Namen »Deutsche« oder »Naturrichtige Physik«.

natürlich stabil!

Wie löst man diesen Widerspruch? Wir dürfen uns Elektronen und andere Teilchen nicht mehr als kleine Kugeln vorstellen.⁴ Teilchen sind in Wirklichkeit **Wellenfunktionen**, die den Raum ausfüllen und sich daher nicht an einem bestimmten Ort aufhalten, wie wir das von makroskopischen Körpern erwarten würden. Das Verhalten der Wellenfunktionen wird von der *Schrödinger-Gleichung* vorhergesagt. Mit ihr kann man auch erklären, warum das Emissionsspektrum von Atomen klare Linien aufweist – das haben Sie ja schon am Prismenspektrometer sehen können.

Die Schwarzkörperstrahlung ist die elektromagnetische Strahlung, die von einem idealen schwarzen Körper bei einer bestimmten Temperatur ausgesendet wird.⁵ Max Planck hatte ein *kontinuierliches* Strahlungsspektrum berechnet, was aber zu einem mathematischen Widerspruch⁶ führte. Er fand auch heraus, dass er dieses Problem mit *diskreten* Energieniveaus nicht hatte, wusste aber zunächst nicht, was das bedeuten sollte. Später wurde klar: Die Rechnung mit diskreten Energieniveaus ist korrekt, denn Energie wird nur in Portionen, sog. Quanten übertragen.⁷

Licht zeigt sowohl Eigenschaften einer Welle als auch eines Teilchenstroms. Außerdem zeigt eine Analyse des *Photoeffekts*,⁸ dass die maximale Energie, die ein Lichtstrahl auf *ein einzelnes Teilchen* übertragen kann, proportional zu seiner Frequenz ist – nicht zur Amplitude, wie man es bei klassischen Wellen erwarten würde. Die Lösung zu diesem scheinbaren Widerspruch: Licht besteht aus *Photonen*. Photonen sind Teilchen, aber sie haben eine Wellenlänge λ und eine Frequenz ν .

6.3.2 Das Wasserstoffatom

Wasserstoff ist das einfachste Element: Ein Proton, ein Elektron, das ist alles. Die ersten Versuche, das Linienspektrum der Elemente zu erklären, konzentrierten sich daher auch auf Wasserstoff und wurden später auf schwerere Elemente erweitert.

Der dänische Physiker Niels Bohr entwickelte 1913 ein Atommodell, das auf wenigen Annahmen beruhte und das Linienspektrum des Wasserstoffatoms korrekt berechnen konnte. Eine der Annahmen war, dass das Elektron sich auf einer Kreisbahn um das Proton bewege, was im Widerspruch zur klassischen (nicht quantenhaften) Elektrodynamik steht – das wissen Sie (siehe letzter Abschnitt) und das wusste auch schon Bohr. Das Bohrsche Atommodell kommt also über offensichtlich falsche Annahmen zu einem korrekten Zwischenergebnis. Mit der Entwicklung der Quantenmechanik kann es daher seit 1925 als überholt bezeichnet werden, trotzdem wird es in der Schule und auch hier, im Nebenfachpraktikum, immer noch gelehrt, weil es ohne große formale Anforderungen zum richtigen Ergebnis führt.

Sowohl im Bohrschen als auch im quantenmechanischen Atommodell stehen dem Elektron nur eine Reihe von *Energieniveaus* E_n zur Verfügung, dazwischen sind »verbotene« Bereiche, in denen man es nie antreffen wird.⁹ Die Energieniveaus berechnet man wie folgt:

⁴ Ja, das haben wir alle gemacht...

⁵ Diese Wärmestrahlung ist der Grund, warum eine Tasse Kaffee auch im Vakuum kalt werden kann.

⁶ Das Spektrum konvergiert in dieser Rechnung für hohe Frequenzen/Energien nicht schnell genug, dadurch ist die gesamte abgestrahlte Energie unendlich – die sog. *Ultraviolettkatastrophe*.

⁷ Ein Energiequant kann jede beliebige Energie haben, so wie ein (großer) Eimer jede beliebige Menge Wasser aufnehmen kann – er muss aber ganz verbraucht werden oder gar nicht. Man kann quasi immer nur ganze Eimer transportieren, nicht umgießen.

⁸ Für die Erklärung des Photoeffekts bekam Albert Einstein übrigens seinen Nobelpreis, nicht für die Relativitätstheorie.

⁹ Ein Übergang zwischen zwei Energieniveaus heißt auch »Quantensprung«, aber so sprunghaft ist das gar nicht: Die zeitabhängige Schrödingergleichung beschreibt die Bewegung des Elektrons auch zwischen zwei Energieniveaus. Bloß bei einer Messung muss sich das Elektron sozusagen erst für einen erlaubten Zustand entscheiden.

$$E_n = -\frac{m_e \cdot e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (6.1)$$

Dabei ist m_e die Elektronenmasse, e die Elementarladung und ϵ_0 die elektrische Feldkonstante. n ist eine sog. *Quantenzahl*, welche nur ganzzahlige positive Werte annehmen kann. Nur der Term $1/n^2$ ist variabel, die Vorfaktoren sind alle konstant. Im Bohrschen Atommodell korrespondieren diese Energieniveaus mit Kreisbahnen, im quantenmechanischen Atommodell findet man stattdessen kugelsymmetrische Verteilungen für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Elektrons. Das Elektron kann zwischen den Energieniveaus »springen«, dabei wird Energie in Form von Licht emittiert oder absorbiert; es gilt Formel 6.3. Die Energiedifferenz für einen Elektronenübergang von einem Zustand n_1 zum Zustand n_2 folgt aus Gleichung 6.1:

$$\Delta E = E_{n_1} - E_{n_2} = -\frac{m_e \cdot e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \cdot \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (6.2)$$

Ist $n_1 > n_2$ und damit $E_{n_1} > E_{n_2}$, so manifestiert sich die freiwerdende Energie ΔE in Form eines Photons mit der Frequenz $\nu = \Delta E/h$. Das gleiche Photon ist vonnöten, um das Atom *anzuregen*, d.h. den umgekehrten Übergang vom tieferen aufs höhere Energieniveau zu bewirken. Je größer der Unterschied zwischen den Quantenzahlen n_i , desto größer die Energiedifferenz ΔE . Bei jedem Übergang wird immer nur *ein* Photon absorbiert oder emittiert.

n_2	Name	Spektralbereich
1	Lyman-Serie	ultraviolett
2	Balmer-Serie	sichtbar
3	Paschen-Serie	nahes Infrarot
4	Brackett-Serie	fernes Infrarot

Tabelle 6.1: Serien von Spektrallinien des Wasserstoffatoms.

Historisch wurden die Spektrallinien des Wasserstoffatoms in verschiedene *Serien* unterteilt, vgl. Tabelle 6.1. Die Gemeinsamkeit der Übergänge in jeder Serie ist dabei der Endzustand mit der Quantenzahl n_2 . Die Balmer-Serie hat als einzige Linien im sichtbaren Bereich – deren Wellenlängen bestimmen Sie im gleichnamigen Versuch, siehe 6.4.6.

ANWENDUNG

Das Bohrsche Atommodell ist zunächst nur auf Atome mit einem Elektron anwendbar. Größere Atome haben komplexere Spektren, die sich im Rahmen der Quantentheorie erklären und berechnen lassen. Atome, die in Molekülen oder Festkörpern gebunden sind, haben zusätzlich zu ihren atomaren Spektrallinien sogar noch weitere Anregungszustände, denn sie können schwingen, rotieren usw.

Das Spektrum einer Substanz ist für sie charakteristisch, wie ein physikalischer Fingerabdruck. Aus dem Spektrum einer Probe kann man daher auf ihre Zusammensetzung schließen. Es gibt eine Vielzahl von spektroskopischen Verfahren, die sich nach Art der Messung (Absorption oder Emission?) und nach der Art der Strahlung (Licht von Mikrowellen bis Gamma-Strahlung, aber z.B. auch Elektronen) unterscheiden. Sie gehören zu den wichtigsten Analysemethoden in vielen naturwissenschaftlichen Bereichen, unter anderem in der Biochemie.

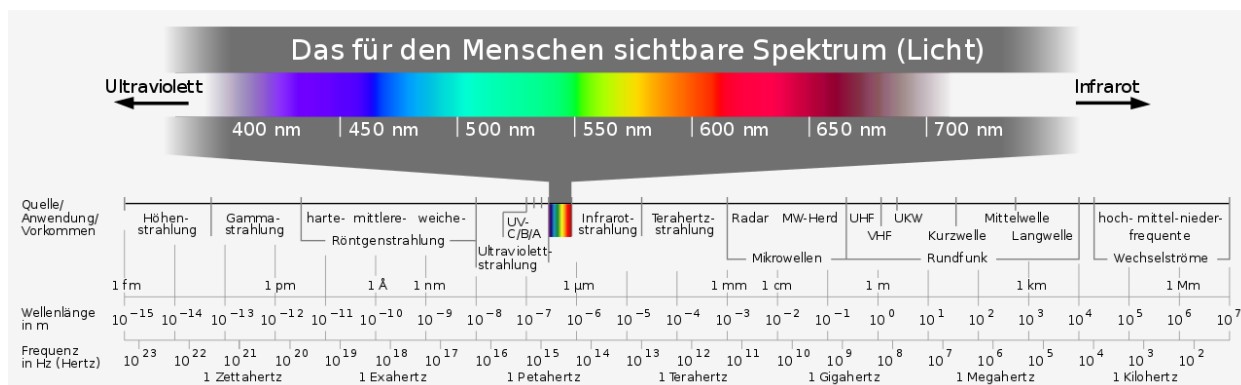


Abbildung 6.1: Das gesamte Spektrum elektromagnetischer Wellen.
Bild: Wikimedia / Horst Frank

6.3.3 Licht ist (auch) eine Welle

Licht besteht aus **Photonen**. Photonen sind Teilchen, aber sie haben eine Wellenlänge λ und eine Frequenz f . Die Wellenlänge von blauem Licht ist kürzer als die von rotem Licht. Die Energie E eines Photons ist proportional zu seiner Frequenz f :

$$E = hf \quad (6.3)$$

Der Proportionalitätsfaktor h ist eine Naturkonstante, er heißt »Plancksches Wirkungsquantum«. Wellenlänge und Frequenz hängen wie folgt zusammen:

$$c = \lambda f \quad (6.4)$$

Dabei ist c die Lichtgeschwindigkeit.

Licht ist also (auch) eine Welle, aber eine Welle aus was? Eine Welle in einem Gewässer besteht aus einer Störung im Wasserstand, die sich ausbreitet. Licht ist ein elektromagnetisches Feld, das sich ausbreitet. Ob man von *elektromagnetischen Wellen* oder von Licht spricht, hängt nur vom Wellenlängenbereich ab; die Unterscheidung ist absolut willkürlich. Radiowellen, Mikrowellen, Sonnenlicht, Gamma-Strahlung? – alles eins. Abbildung 6.1 zeigt das gesamte Spektrum elektromagnetischer Strahlung; das für uns sichtbare Licht macht darin nur einen schmalen Bereich aus.

Ob Licht seine Teilchen- oder seine Wellennatur zeigt, hängt vom Experiment ab. Meistens ist die Näherung »Lichtstrahl« sowieso ausreichend (wie am 5. Versuchstag); erst bei kleinen Strukturen, die in der gleichen Größenordnung wie das verwendete Licht rangieren, kann man Welleneffekte beobachten. Teilcheneffekte sind noch schwieriger zu zeigen, weil der Impuls der Photonen verschwindend klein ist.

Als Welle kann Licht Dinge, die ein klassisches Teilchen oder ein Strahl nicht können: um die Ecke fliegen (Beugung) und sich selbst auslöschen (Interferenz).

6.3.4 Beugung

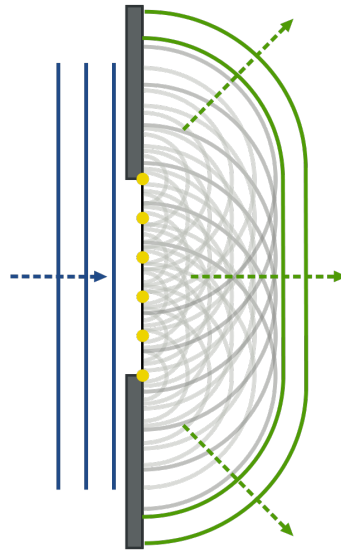
Betrachten Sie Abbildung 6.2 – wenn eine ebene Wellenfront auf eine Kaimauer oder einen Wellenbrecher trifft, wird die Welle nicht einfach an dieser Stelle »abgeschnitten«. Stattdessen breitet sie sich hinter der Öffnung in der Fahrwinne mehr oder weniger kreisförmig aus. Wellen können

Wenn Lichtwellen durch ein Medium reisen, ändert sich dort ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit und somit auch ihre Wellenlänge, vgl. 5.3.8 auf Seite 86. Da die Energie aber von der (nicht veränderlichen) Frequenz abhängt, gilt trotzdem Energieerhaltung.

Es gibt einen beliebten Versuch, bei dem eine Art Windrad, nahezu reibungsfrei im Vakuum gelagert, mit Licht beschienen wird. Die »Flügel« sind einseitig schwarz beschichtet, auf der anderen Seite verspiegelt. Das Rad beginnt tatsächlich, sich zu drehen – allerdings in die falsche Richtung! Die Impulsübertragung müsste auf der verspiegelten Seite größer sein, in Wirklichkeit hat die thermische Erwärmung der verbliebenen Luft auf der geschwärzten Seite aber einen weitaus größeren Einfluss.



(a) Beugung an Wellenbrechern an einem Strand bei Rimini.



(b) Erklärung der Beugung von ebenen Wellen nach dem Huygenschen Prinzip: Jeder Punkt der Wellenfront ist Ausgangspunkt einer kreisförmigen Welle.

Abbildung 6.2: Beugungseffekte und wie man sie erklären kann.

sich offenbar auch »um die Ecke« ausbreiten. Dabei gilt das **Huygensche Prinzip**, welches besagt, dass jeder Punkt einer Wellenfront als Ausgangspunkt einer neuen sog. Elementarwelle betrachtet werden kann.

Kann man auch Licht beugen? Ja, aber damit der Effekt sichtbar wird, darf die Spaltöffnung nicht viel größer sein als die Wellenlänge des Lichtes. Man spricht von der *Beugung an optischen Spalten* oder *Gittern* – dabei treten immer auch Interferenzeffekte auf.

6.3.5 Interferenz

Wenn sich zwei Lichtwellen in einem Punkt treffen, addieren sich einfach ihre elektromagnetischen Felder.¹⁰ Die Wellen überlagern sich und setzen ihren Weg anschließend fort, als wäre nichts gewesen. Wenn man allerdings genau an diesem Punkt die Intensität des Lichtes misst – z.B., indem man einen Schirm oder einen Sensor dort aufstellt – wird man überraschende Effekte beobachten.

Durch Interferenz können sich zwei Wellen bei Überlagerung verstärken (*konstruktive Interferenz*) – das ist keine Überraschung –, aber auch gegenseitig komplett auslöschen (*destruktive Interferenz*). Besonders deutlich treten diese Effekte zutage, wenn beide Wellen die gleiche Wellenlänge haben und *kohärent* sind, d.h. es kommt eine kontinuierliche Wellenform ohne Unterbrechungen und Verschiebungen. Abbildung 6.3 zeigt diesen Fall: Welle 1 und 2 sind identisch, bis auf ihre Verschiebung relativ zueinander, den sog. *Gangunterschied* δ . Im linken Bild ist sie null; die Wellen addieren sich zu einer Welle mit doppelter Amplitude (und gleicher Wellenlänge). Im rechten Bild beträgt der Gangunterschied genau eine halbe Wellenlänge – die Wellen addieren sich zu allen Zeiten zu null; sie löschen sich gegenseitig aus.

¹⁰ Diese Additivität, die viele Felder aufweisen, nennt man *Superpositionsprinzip*. Es gilt nie ganz ohne Einschränkungen: Wenn sich Wasserwellen überlagern, erreichen sie schnell eine Höhe, bei der das Wasser auf dem Wellenberg zur Seite wegfließt – die Welle *bricht*. Und mit besonders kurzen Laserpulsen (Größenordnung: Picosekunden, Femtosekunden, ...) kann man Felder erzeugen, die so stark sind, dass sie z.B. Moleküle in Festkörpern merklich verformen können. Die verformte Materie hat dann wiederum einen Einfluss auf die Ausbreitung des Lichtes. Mit diesen Effekten beschäftigt sich die *Nichtlineare Optik*.

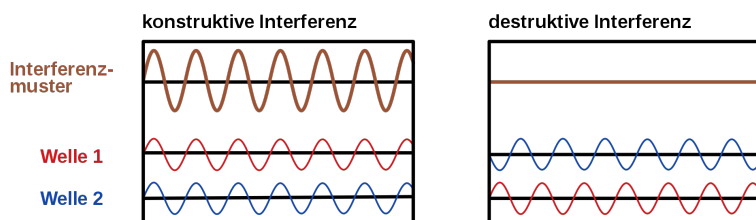


Abbildung 6.3: Konstruktive und destruktive Interferenz. Entscheidend ist der *Gangunterschied* zwischen Welle 1 und 2.

ANWENDUNG

Offensichtlich kommt es auf das Zusammenspiel von Wellenlänge und Gangunterschied an, ob zwei Wellen sich konstruktiv oder destruktiv überlagern. Dadurch kann sich ein faszinierendes Farbenspiel ergeben. In der Natur findet man häufig Beispiele für **Dünnschichtinterferenz** – diese tritt auf, wenn eine Oberfläche von einer sehr dünnen Schicht eines anderen Materials bedeckt ist. An beiden so entstehenden Grenzschichten werden Teile des einfallenden Lichtes reflektiert; anschließend haben sie einen kleinen Gangunterschied zueinander. Auf diese Weise bekommen Ölflecken, Seifenblasen, viele Insekten, aber auch Vögel ihr schillerndes Aussehen, siehe Seite 102.

Falls bei einem Konzert mehrere **Subwoofer** eingesetzt werden, sollten diese möglichst nahe beieinander stehen. Andernfalls lässt es sich nicht vermeiden, dass bestimmte Frequenzen an bestimmten Orten im Publikum gänzlich ausgelöscht werden. Insbesondere bei elektronischer Musik ist das ein Problem, weil Bässe sich immer im gleichen Frequenzbereich wiederholen. Dass die Bassboxen trotzdem oft links und rechts neben der Bühne stehen, hat wohl praktische und/oder optische Gründe.

Die Gravitationskraft des Mondes bewegt die Wassermassen auf der Erde. Sie folgen der Position des Mondes am Erdhimmel, allerdings mit einer gewissen Verzögerung (Wasser braucht Zeit zum Fließen). Das führt zu **Gezeitenwellen**, die in manchen Flüssen (z.B. Weser und Ems) sichtbar werden und teilweise sogar so hoch werden, dass man auf ihnen surfen kann. Gezeitenwellen werden an den Landmassen reflektiert, gebrochen, gebeugt und sie können miteinander interferieren. Es gibt sie überall auf den Weltmeeren – außer an den *amphidromischen Punkten*. Hier löschen sich die Gezeitenwellen aus allen Richtungen insgesamt aus; es gibt keinen Tidehub, die Tidewellen rotieren um diese Punkte herum. In der Nordsee gibt es gleich drei solcher Punkte.

6.3.6 Optische Spalte und Gitter

Das **Doppelspalt-Experiment** ist eines der berühmtesten in der Quantentheorie und in der Physik insgesamt. Es wurde unzählige Male auf verschiedene Weise wiederholt, z.B. mit einzelnen Photonen (diese können mit sich selbst interferieren); immer wieder wurde die Nullhypothese, also die Gültigkeit der Quantentheorie, bestätigt.

Am einfachsten führt man das Experiment mit einem Laser und zwei dünnen Spalten durch. Diese Anordnung ist in Abbildung 6.5 schematisch dargestellt. Die Spalte müssen sehr klein und sehr nah beieinander sein, der Schirm (am rechten Rand) ist hingegen mehr als einen halben Meter von den Spalten entfernt – um diese ungleichen Größenverhältnisse darzustellen, wurde die horizontale Achse unterbrochen. Behalten Sie das im Hinterkopf, es wird noch wichtig sein.

Das Laserlicht, welches auf die Spalte trifft, soll möglichst *kohärent* sein: Es soll nur eine Wellenlänge haben, und die Wellenberge und -täler sollen perfekt übereinanderliegen und eine ebene Wellenfront bilden. Treffen diese kohärenten Wellen nun auf die Spalte, werden sie gebeugt (s.o.), das



(a) Der Strand offenbart das Interferenzmuster von Meereswellen, die zuvor an der Öffnung eines Wellenbrechers gebeugt wurden.



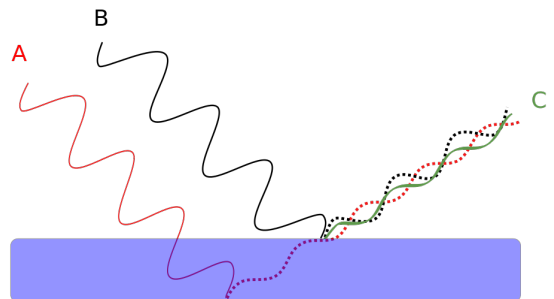
(b) Auch die Purpurkehlhympe schillert dank Interferenz an einer Dünnschicht.



(c) Auch die Augen des Pfauenauges entstehen durch einen waschechten Quanteneffekt (Dünnschichtinterferenz).



(d) Dieser Wismutkristall ist von einer dünnen Oxidschicht bedeckt. Je nach Dicke entstehen durch Interferenz verschiedene Farbeindrücke. Rechts unten im Bild ist ein noch nicht oxidiertes Wismutkristall zu sehen.



(e) So entsteht (destruktive) Interferenz an dünnen Schichten: Die Lichtwellen A und B werden an verschiedenen Grenzflächen reflektiert und erhalten dadurch einen Gangunterschied.

Abbildung 6.4: Interferenz.

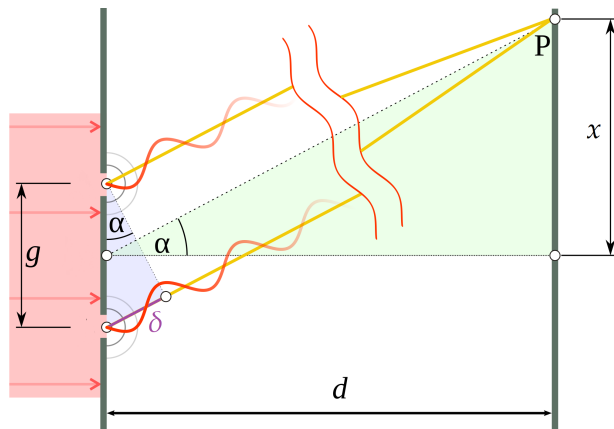


Abbildung 6.5: Schematische Darstellung des Doppelspaltexperiments. Der Abstand d zwischen Spalt und Schirm ist viel größer als die Spaltbreite g , daher werden die Lichtstrahlen hier unterbrochen dargestellt.

heißt, sie pflanzen sich nicht mehr nur geradlinig fort.

Abbildung 6.5 zeigt exemplarisch zwei solche Lichtwellen, die zufällig (fast) in die gleiche Richtung (Winkel α) gebeugt werden. Sie haben zunächst den Abstand g (die sog. *Gitterkonstante*) zueinander, und da sie in die gleiche Richtung gebeugt werden, sind sie außerdem parallel. Dennoch treffen sie den Schirm im gleichen Punkt. Das ist (näherungsweise) beides miteinander vereinbar, wenn der Schirm nur weit genug vom Spalt entfernt ist. **Einverstanden?**

Wenn die Wellen sich im Punkt P treffen, werden sie miteinander interferieren. Was dabei passiert, hängt vom Winkel α ab, denn die untere Welle hat offenbar einen etwas längeren Weg als die obere. Wie groß ist der Unterschied? Dazu betrachten wir das kleine rechtwinklige Dreieck (blau eingezeichnet). Dort findet sich der Winkel α wieder und es gilt:

$$\sin \alpha = \frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Hypotenuse}} = \frac{\delta}{g} \quad (6.5)$$

Wir werden reine konstruktive Interferenz beobachten, wenn der Gangunterschied genau ein Vielfaches der Wellenlänge beträgt (dann liegen die Wellen wieder perfekt übereinander). Umgekehrt werden die Wellen sich vollständig auslöschen, wenn der Gangunterschied $0,5\lambda, 1,5\lambda, 2,5\lambda, \dots$ beträgt, denn dann sind die Wellen genau entgegengesetzt, wenn sie sich treffen. Wir halten diese Erkenntnis formal so fest:

$$\sin \alpha = \frac{\delta}{g} \stackrel{!}{=} \frac{k \cdot \lambda}{g}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{für konstruktive Interferenz}), \quad (6.6)$$

$$\sin \alpha = \frac{\delta}{g} \stackrel{!}{=} \frac{(2k+1) \cdot \lambda}{2 \cdot g}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{für destr. Interferenz}). \quad (6.7)$$

Dabei ist k eine ganze Zahl, die wir die *Ordnung* nennen. Somit haben wir eine Bedingung für die Winkel, unter denen wir im Interferenzmuster Maxima bzw. Minima der Intensität messen (oder sehen) werden. Da (im grünen Dreieck) außerdem $\tan \alpha = \frac{x}{d}$ gilt, können wir diese Beziehung ohne großen Aufwand auch auf Abstände x auf dem Schirm anwenden, die einfach zu messen sind.

Wenn nun zu den zwei Spalten ein dritter hinzukommt, ändert sich an den Bedingungen von Gleichung 6.7 nichts. Auch wenn man ein Gitter mit 600 Spalten hat – pro Millimeter –, gelten weiterhin diese Formeln.

Etwas anders wird es, wenn nur ein Spalt vorhanden ist. Auch dann finden Beugung und Interferenz statt. Die Herleitung verläuft analog zu der

Falls nicht: Stellen Sie sich zwei dünne Fäden vor, die sie zwischen Ihren ausgestreckten Armen auf Spannung halten. In der rechten Hand halten Sie beide Fäden in einem Punkt fest, in der linken Hand fassen Sie die Fäden so, dass zwischen ihnen ein Millimeter Platz ist. Sind die Fäden jetzt nicht einigermaßen parallel? Im Experiment sind die »Fäden« übrigens nur $1/600$ mm voneinander entfernt.

für den Doppelspalt. Es zeigt sich, dass die Bedingungen für Maxima und Minima genau vertauscht sind – mit einer kleinen Einschränkung: In der Mitte des Beugungsmusters (also da, wo das Licht ohne Quanteneffekte vollständig auftreffen würde) ist auch beim Einfachspalt ein Maximum. Dadurch ist der Abstand zwischen den Maxima 0. und 1. Ordnung 1,5-mal so groß wie der aller weiteren Maxima.

Insgesamt haben wir somit die folgenden Bedingungen für die Winkel der Beugungsmaxima und -minima:

	Doppelspalt & Gitter	Einfachspalt
Maxima	$\sin \alpha \stackrel{!}{=} \frac{k \cdot \lambda}{g}, k = 0, 1, 2, \dots$	$\sin \alpha \stackrel{!}{=} \frac{(2k+1) \cdot \lambda}{2 \cdot b}, k = 0, 1, 2, \dots$
Minima	$\sin \alpha \stackrel{!}{=} \frac{(2k+1) \cdot \lambda}{2 \cdot g}, k = 0, 1, 2, \dots$	$\sin \alpha \stackrel{!}{=} \frac{k \cdot \lambda}{b}, k = 1, 2, \dots$

ANWENDUNG

Optische Datenträger wie CDs, DVDs haben ein feines Rillenmuster mit rund 1000 Bahnen pro Millimeter. Das erzeugt Beugungseffekte, die sich als Farberscheinungen (»Regenbogen«) zeigen. Auch Vogelfedern stellen ein optisches Gitter dar – unter idealen Bedingungen kann man feine Regenbogen sehen, wenn man sie gegen das Licht hält.

Tabelle 6.2: Winkelbedingungen für Maxima und Minima in den Interferenzmustern von Doppel- und Einfachspalt sowie optischem Gitter. Dabei ist b die Spaltbreite, g wie oben beschrieben der Abstand zwischen jeweils zwei benachbarten Spalten.

6.3.7 Die Grenzen der Auflösung

Die **numerische Apertur** ist ein Maß dafür, wie stark eine Linse (meist geht es um Objektive von Mikroskopen) Licht fokussieren kann – davon hängt nämlich ab, wie klein ein Lichtfleck im Fokus der Linse werden kann. Je kleiner die Wellenlänge des verwendeten Lichtes und je größer die numerische Apertur, desto kleinere Strukturen kann man mit dem optischen System auflösen, ohne dass Beugungseffekte den Kontrast vermindern. Wie groß die numerische Apertur eines Objektivs ist, hängt von seiner Brennweite und seiner (effektiven) Größe ab; wir können die numerische Apertur aber auch direkt bestimmen.

Eine Linse befindet sich vor einem Objekt O und bildet dieses auf die Bildebene O' ab, vgl. Abb. 6.6. Die numerische Apertur ist definiert über den Sinus des halben objektseitigen Öffnungswinkels α :

$$A_N = n \cdot \sin \alpha \quad (6.8)$$

Dabei ist n der Brechungsindex des Mediums zwischen Objekt und Linse. In Luft ($n = 1$) ist also immer $A_N < 1$, aber mit *Immersionöl* kann die numerische Apertur von *state-of-the-art*-Objektiven auf Werte von bis zu 1,4 gesteigert werden.

Man kann zeigen, dass der kleinste Abstand, der gerade noch aufgelöst werden kann, umgekehrt proportional zur numerischen Apertur ist

$$d_{min} = \frac{0,61 \cdot \lambda}{A_N} \quad (6.9)$$

Mit λ als Wellenlänge des verwendeten Lichtes.

Für Mikroskopie in Luft kann man sich daher als grobe Faustformel merken: $d_{min} \lesssim \lambda$ – man kann nichts auflösen, was kleiner ist als die Wellenlänge des benutzten Lichtes. Unter Ausnutzung aller Tricks (Immersionöl,

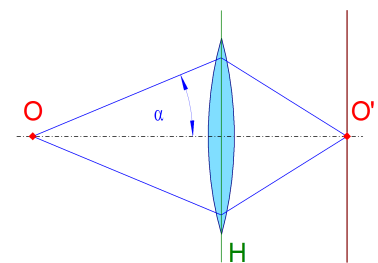


Abbildung 6.6: Der objektseitige Öffnungswinkel.

Statt über den kleinsten auflösbaren Abstand zu reden, kann man auch das **Auflösungsvermögen** $A = 1/d_{min}$ definieren – das ist Geschmackssache.

nichtlineare optische Materialien, ...) kann man diese Grenze zwar noch etwas verschieben, aber letztlich gilt: Wenn man noch kleinere Dinge sehen möchte, muss man die Wellenlänge verkleinern. Zum Beispiel mit Elektronen statt Licht – diese haben als Quantenobjekte auch eine Wellenlänge, diese ist aber wesentlich kürzer als die von sichtbarem Licht. So lassen sich Bilder mit unglaublich kleinen Details aufnehmen wie z.B. Abbildung 6.7.

Für spektroskopische Messmethoden ist es oft wichtig zu wissen, welche Wellenlängendifferenz ein Spektrometer noch auflösen kann. In einem Teilversuch dieses Versuchstages werden Sie das selbst untersuchen. Das (spektrale) **Auflösungsvermögen eines Gitters** hängt unter anderem von der Beugungsordnung ab:

$$(\Delta\lambda)_{min} = \frac{\lambda}{k \cdot N}$$

Dabei ist $(\Delta\lambda)_{min}$ die kleinste noch auflösbare Wellenlängendifferenz, λ die Wellenlänge, k die Beugungsordnung und N die Anzahl der beleuchteten Spalte im optischen Gitter. Feine Gitter, großflächig ausgeleuchtet, liefern also die besten Ergebnisse.

6.4 Experimentelle Aufgaben

6.4.1 Beugung am Einfachspalt

Der Strahl eines grünen Lasers trifft auf einen schmalen Spalt und wird daran gebeugt (siehe Abb. 6.8). Durch Interferenz entsteht eine Intensitätsverteilung, die Sie mit einem CCD-Sensor aufnehmen können.

Direkt hinter dem Spalt ist außerdem eine Sammellinse eingebaut. Sie sorgt dafür, dass der effektive Abstand zwischen Spalt und Sensor ausreichend groß ist; außerdem passt Sie die Größe des Interferenzmusters an den CCD-Sensor an. Die Brennweite f entspricht dadurch dem Abstand d in der Berechnung des Beugungswinkels, demnach also $\tan \alpha = \frac{x}{f}$. Noch folgender Hinweis: für die Fehlerrechnung (nicht für den Beugungswinkel selbst) können Sie hier und im weiteren Verlauf zur Vereinfachung immer die Kleinwinkelnäherung benutzen, d.h. $\tan \alpha = \frac{x}{f} \approx \alpha$.

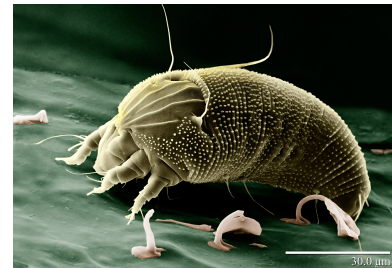
Geräte: Grüner Nd:YAG Laser, optische Bank, Reiter, Spalt in Justierfassung, CCD (Sensorgröße 4,8 mm × 3,6 mm) mit Rohraufsatz, Sammellinse ($f = (130 \pm 2)$ mm), Notebook.

Gemessene Größen: Bild des Beugungsmusters.

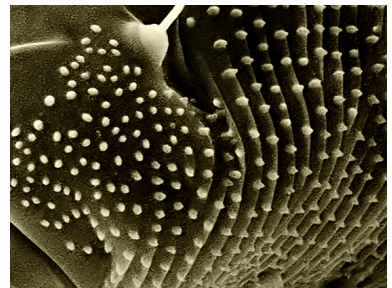
Gegebene Größen: Wellenlänge des Laserlichtes $\lambda = 532$ nm.

Durchführung:

- Entfernen Sie die Schutzkappe von der CCD-Kamera. Der vorgeschraubte Rohraufsatz minimiert den Einfluss von Streulicht und wird nicht entfernt.
- Für die Bildaufnahme benutzen Sie das Programm 'ICapture'. Die technische Assistenz wird Sie in die Bedienung der Software einführen.



(a) Gesamtansicht.



(b) Detail.

Abbildung 6.7: Elektronenmikroskopie einer Milbe (*Aceria anthocoptes*), nachträglich eingefärbt.

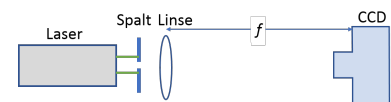


Abbildung 6.8: Schematischer Versuchsaufbau für die Beugung am Einfachspalt.

Achtung! Die CCD-Kamera wird ohne schützendes Objektiv genutzt, der empfindliche Sensor ist daher frei zugänglich. Er darf auf keinen Fall mit den Fingern oder einem Gegenstand berührt werden. Wird die Kamera nicht mehr benutzt, muss umgehend die Schutzkappe aufgesetzt werden!

- Das gesuchte Beugungsmuster entsteht genau in der hinteren Brennebene der Linse (also ca. 130 mm hinter der Linse), da wo die vertikale Ausdehnung des Beugungsmusters minimal ist. Positionieren Sie die Kamera möglichst genau in dieser Ebene. Nehmen Sie ein **Bild** des Beugungsmusters auf und speichern Sie es im bmp-Format, z.B. auf einem USB-Stick.
- Für die Auswertung benutzen Sie das Programm 'GWYIDDION', in dessen Bedienung Sie ebenfalls vor Ort eingeführt werden.

6.4.2 Beugung am Hindernis

Der Aufbau ist nahezu identisch zum vorangegangenen Versuch in Kap. 6.4.1. Jetzt trifft der Strahl des grünen Lasers allerdings auf einen dünnen Draht und wird an diesem Hindernis gebeugt. Erneut entsteht das Beugungsbild in der hinteren Brennebene der Linse, das wiederum mit einem CCD-Sensor registriert werden kann.

Geräte: Grüner Nd:YAG Laser, optische Bank, Reiter, Draht in Justierfassung, CCD (Sensorgröße 4,8 mm × 3,6 mm) mit Rohraufsatz, Sammellinse ($f = (130 \pm 2)$ mm), Notebook.

Gemessene Größen: Bild des Beugungsmusters.

Gegebene Größen: Wellenlänge des Laserlichtes $\lambda = 532$ nm.

Durchführung: identisch zum vorangegangenen Versuch.

6.4.3 Gitterspektrometer

Das Goniometer kennen Sie noch vom letzten Versuchstag. Statt eines Prismas benutzen Sie heute optische Gitter verschiedener Qualität, um die Spektren von Natrium und Helium zu untersuchen.

Geräte: Spektrallampen (Natrium und Helium), Stativ mit Fassung, Netzgerät für Spektrallampe, Spektro-Goniometer, 2 Gitter (100er und 600er), Spaltblende (1 mm).

Gegebene Größen: Gitterkonstante $g = \frac{1}{100}$ mm bzw. $\frac{1}{600}$ mm, Breite der Spaltblende $d = (1,1 \pm 0,1)$ mm, Literaturspektren (siehe Anhang Seite 112).

Gemessene Größen: Positionen der Spektrallinien δ_m und des Strahldurchgangs δ_0 .

1. Durchführung – Helium:

- Stellen Sie die **He-Lampe** vor den Eingangsspalt des Goniometers.
- Setzen Sie das **600er-Gitter** in die dafür vorgesehene Befestigung ein.
- Vermessen Sie das **Spektrum** der He-Lampe in der ersten Beugungsordnung. Notieren Sie die **gemessenen Winkel** δ_m und außerdem die ungefähre **Helligkeit** der Linien, damit Sie sie später den Literaturdaten zuordnen können.

Zusatzinfo für Chemiker, die schon mehr über Quantenmechanik wissen: Natrium hat eine sehr dominante D-Linie – in einem Gelbton, den man von den Natriumdampflampen in Straßenlaternen kennt. Diese Linie besteht eigentlich aus zwei Linien, die sehr eng beieinander liegen. Die Energieniveaus, von denen die Elektronenübergänge ausgehen, die diese Photonen aussenden, haben die gleiche Hauptquantenzahl, aber trotzdem verschiedene Energien (»Entartung«), weil der Spin der Elektronen an den Bahndrehimpuls koppelt und es daher einen (winzigen) Unterschied macht, ob der gerade Spin parallel oder antiparallel zum Bahndrehimpuls steht.

Achtung! Gasentladungslampen dürfen nicht in schneller Folge aus- und wieder eingeschaltet werden. Tun Sie beides nur in Absprache mit Ihrer Tutorin oder der technischen Assistenz.

- Messen Sie außerdem den Winkel des **Strahlendurchgangs** δ_0 (Maximum der nullten Beugungsordnung).

2. Durchführung – Natrium (100er):

- Stellen Sie die **Na-Lampe** vor den Eingangsspalt des Goniometers.
- Entfernen Sie das Gitter und blicken Sie durch das Okular. Sie sollten eine einzelne gelbe Linie finden – den **Strahlendurchgang**.
- Setzen Sie das **100er-Gitter** ein.
- Befestigen Sie die **Spaltblende** zentriert am Gitter.
- Fahren Sie das Rohr nun langsam in eine Richtung (egal, welche). Sie werden immer wieder die gleiche gelbe (Doppel-) Linie des Natriums sehen. Zählen Sie bis zur **Beugungsordnung** k , bei der sie erkennen können, dass es sich um eine Doppellinie handelt.

In diesem Versuchsteil geht es um das spektrale Auflösungsvermögen des Gitters, vgl. 6.3.7.

3. Durchführung – Natrium (600er):

- Stellen Sie die **Na-Lampe** vor den Eingangsspalt des Goniometers, falls sie dort nicht schon steht.
- Setzen Sie das **600er-Gitter** ein.
- Suchen Sie die **zweite Beugungsordnung** der Natrium-D-Linie. Sie sollten deutlich erkennen können, dass es sich um eine Doppellinie handelt.
- Messen Sie die Winkel für beide Teile der Doppellinie **möglichst präzise**.
- Messen Sie außerdem den Winkel des **Strahlendurchgangs** δ_0 , falls Sie es noch nicht gemacht haben.

In diesem Versuchsteil versuchen Sie die Aufspaltung der Na-Doppellinie zu messen, was das Goniometer an die Grenzen seiner Winkelauflösung bringt.

6.4.4 CD oder DVD?

Optische Datenträger haben gepresste Spuren, die entweder zur Führung des Schreiblasers dienen (bei Rohlingen) oder die Daten schon als eingepresste Strukturen enthalten (bei *Read Only Media*, ROMs.). Der Abstand zwischen den Spuren ist so klein (ca. $1\ \mu\text{m}$), dass die Datenträger wie ein Reflexionsgitter wirken – daher auch das Farbenspiel, wenn man sie ins Licht hält.

Geräte: grüner Laserpointer, optische Bank, Reiter, CD- und DVD-Rohling in U-Halter mit Kunststoffplatte.

Gemessene Größen: Abstände zwischen Datenträgern und Schirm l_i , Position des k -ten Interferenzmaximums für jeden Datenträger x_k .

Gegebene Größen: Wellenlänge des Laserlichtes $\lambda = 532\ \text{nm}$, Spurabstände $g_{CD} = (1,6 \pm 0,1)\ \mu\text{m}$ und $g_{DVD} = (0,74 \pm 0,01)\ \mu\text{m}$.

Durchführung:

- **Welche Bedingung** gilt für die Winkel, unter denen die Interferenzmaxima auftreten? Überlegen Sie anhand der Formel, welcher der Datenträger die CD ist und welcher die DVD. Dafür müssen Sie nicht rechnen.

- Befestigen Sie ggf. ein neues A3-Blatt an dem Schirm.
- Justieren Sie die Rohlinge dann so, dass sie **senkrecht zur optischen Achse** stehen. Das Maximum 0. Ordnung sollte dann ungefähr auf den Laserpointer treffen.
- **Markieren** Sie die Lichtpunkte so, dass Sie sie später zuordnen können.
- Wiederholen Sie die Prozedur nun für den anderen Rohling.
- Nehmen Sie das Blatt ab und messen Sie die **Entfernung** zwischen den Punkten. Falls das Maximum 0. Ordnung »ins Loch gefallen« ist (so sollte es sein): Sie können auch die Entfernung der zwei k -ten Maxima zueinander messen und diese halbieren.

6.4.5 Auflösungsvermögen eines Objektivs

Wie stark ein Mikroskop vergrößert, hängt vor allem von der Tubuslänge ab. Beugungseffekte bewirken aber eine Grenze für die so erreichbare Auflösung. Welche Auflösung man mit einem *Objektiv* maximal erreichen kann, hängt maßgeblich von seinem Öffnungswinkel ab. In diesem Versuch messen Sie den Öffnungswinkel eines handelsüblichen Mikroskop-Objektivs und berechnen daraus die *numerische Apertur*.

Geräte: Optische Bank, Taschenlampe

Gemessene Größen: Abstand e zwischen Brennebene und LEDs, Abstand d zwischen den LEDs .

Durchführung:

- Stecken Sie das **Okular** in die dafür vorgesehene Röhre.
- Leuchten Sie von hinten mit einer **Taschenlampe** auf die Lochplatte und schauen Sie durch das Okular. Sie sollten einen hellen Fleck sehen – das ist das kleine Loch im Blech vor dem Objektiv.
- Benutzen Sie die Feinverstellung (**Rändelschraube**) des Justierreiters, um das Loch in die Brennebene zu bewegen. Der gratige Rand sollte scharf erkennbar sein.
- Messen Sie den **Abstand der LEDs zur Brennebene** (Halterung der Lochplatte) e .
- **Entfernen** Sie nun Okular und Lochplatte. Schieben Sie beide LEDs zusammen vor das Objektiv.
- Blicken Sie in die Röhre, in der eben noch das Okular steckte. Betrachten Sie das reelle Bild der LEDs, welches sich kurz vor dem Objektiv befindet. Sie müssen genug **Abstand** halten, um dieses Bild scharf sehen zu können! Bei Normalsichtigen beträgt die Naheinstellungsgrenze ca. 20 cm.
- **Ihre Partnerin** schiebt nun eine der LEDs langsam nach außen, bis sie für Sie gerade nicht mehr sichtbar ist. Mit der anderen LED machen Sie das Gleiche.
- Messen Sie nun den **Abstand zwischen den LEDs** d .

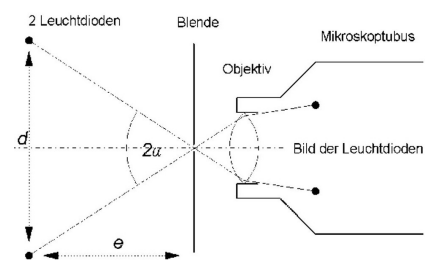


Abbildung 6.9: Schematischer Versuchsaufbau für die Messung der Numerischen Apertur.

6.4.6 Die Balmer-Serie

Von den charakteristischen Wellenlängen, die Elektronenübergänge im Wasserstoffatom erzeugen, liegen nur die Spektrallinien der sog. *Balmer-Serie* im sichtbaren Bereich. In diesem Versuch betrachten Sie das Spektrum der Balmer-Serie, gebeugt durch ein optisches Gitter und können so die Beugungswinkel und daraus schließlich die Wellenlängen der Spektrallinien bestimmen.

Geräte: Optische Bank, Taschenlampe

Gemessene Größen: Position der Spektrallinien vor der Skala, links und rechts: x_l und x_r , Abstand zwischen Skala und Gitter a .

Gegebene Größen: Gitterkonstante $g = \frac{1}{600}$ mm.

Durchführung:

- Betrachten Sie das **Spektrum** durch das Gitter (G). Sie sehen links und rechts das gleiche Farbmuster, gespiegelt an der Gasentladungsröhre (R) in der Mitte. Sie werden ein paar klare Linien sehen und eine Vielzahl von schwächeren Linien, die den Raum dazwischen teilweise ausfüllen.
- Schieben Sie für jede klar erkennbare Linie die orangenen **Schieber** links und rechts auf der Skala (M) genau an die Position, wo sie die Linie sehen. Benutzen Sie ggf. eine Taschenlampe, um die Schieber zu beleuchten.
- Lesen Sie die Skala an den Positionen der beiden Schieber ab und notieren Sie die Werte.
- Messen Sie zuletzt auch noch den **Abstand zwischen Skala und Gitter**.

6.5 Wie geht es weiter?

- Es gibt wieder eine **Checkliste** zur Selbstkontrolle. Gehen Sie diese Liste am Ende zusammen durch und unterschreiben Sie anschließend beide, dass das Protokoll den genannten Ansprüchen genügt.

6.6 Hinweise zur Auswertung

6.6.1 Beugung am Einfachspalt & am Hindernis

Berechnen Sie für jedes gemessene Interferenzminimum die sich daraus ergebende Breite des Drahtes bzw. des Spaltes b mit der richtigen Formel aus Tabelle 6.2. Berechnen Sie auch den Fehler jedes Wertes. Sind die Teilergebnisse der Messreihe alle plausibel? Gibt es vielleicht Ausreißer, die darauf hindeuten, dass die Zuordnung der Beugungsordnung k nicht stimmt?

Idealerweise sollte immer der gleiche Wert herauskommen, daher berechnen Sie zuletzt Mittelwert und Standardabweichung. Gibt es prinzipielle Unterschiede in den beiden Beugungsmustern des Spaltes und des Drahtes?

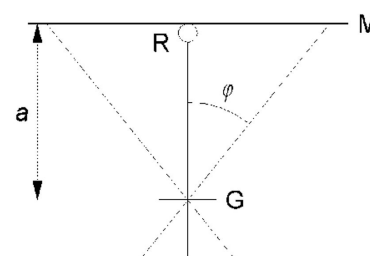


Abbildung 6.10: Schematischer Versuchsaufbau für die Messung der Spektrallinien.

6.6.2 Gitterspektrometer

Berechnen Sie alle relevanten Größen und vergleichen Sie mit den Literaturdaten. Bei der Fehlerrechnung für die Na-Doppellinie werden Sie vermutlich einen relativen Fehler von $\frac{\Delta(\Delta\lambda)}{\Delta\lambda} > 100\%$ erhalten; ziehen Sie entsprechende Schlüsse daraus.

6.6.3 CD oder DVD?

Bestimmen Sie für jede markierte Beugungsordnung den Spurbstand mit der richtigen Formel aus Tabelle 6.2. Berechnen Sie den Mittelwert für beide Datenträger und vergleichen Sie mit den Literaturwerten.

6.6.4 Auflösungsvermögen eines Objektivs

Berechnen Sie den (einfachen!) Öffnungswinkel und daraus die numerische Apertur. Wie genau konnten Sie den Abstand der LEDs einstellen? Berücksichtigen Sie das bei der Fehlerrechnung.

Welches ist der kleinste Abstand, der mit diesem Objektiv auflösbar ist, für rotes und blaues Licht, in Luft und mit Immersionsöl ($n = 1,5$)? Machen Sie eine kleine Tabelle, ohne Fehlerrechnung.

Der vom Hersteller eingravierte **Vergleichswert** ist übrigens 0,25 (falls Sie das übersehen haben).

6.6.5 Die Balmer-Serie

Berechnen Sie für jede Spektrallinie die Wellenlänge und die Energie (mit Fehlern). Berechnen Sie außerdem die Theoriewerte für die Energien der Balmer-Serie und ordnen Sie sie Ihren Messwerten zu. Berechnung und Ergebnis passen in die selbe Tabelle.